

【書類名】 特許願

【整理番号】 DTM00957

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 H01L 27/14

【発明者】

 【住所又は居所】 東京都八王子市石川町 2 9 7 0 番地 コニカ株式会社内

 【氏名】 細江 秀

【特許出願人】

 【識別番号】 000001270

 【氏名又は名称】 コニカ株式会社

【代理人】

 【識別番号】 100107272

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 田村 敬二郎

【選任した代理人】

 【識別番号】 100109140

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 小林 研一

【手数料の表示】

 【予納台帳番号】 052526

 【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

 【物件名】 明細書 1

 【物件名】 図面 1

 【物件名】 要約書 1

 【包括委任状番号】 0101340

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 転写光学面の加工方法、加工機及び光学素子成形用型

【特許請求の範囲】

【請求項1】 光学素子成形用型の転写光学面を構成する材料の硬度がロックウェル硬度HRA80以上もしくはビッカース硬度でHv1000以上であり、その転写光学面を切削加工により創成することを特徴とする転写光学面の加工方法。

【請求項2】 光学素子成形用型の転写光学面を構成する材料の硬度がロックウェル硬度HRA80以上もしくはビッカース硬度でHv1000以上であり、切削工具の切削点を連続的に移動させながら、曲率を有する前記転写光学面を切削加工により創成することを特徴とする転写光学面の加工方法。

【請求項3】 光学素子成形用型の転写光学面を構成する材料の硬度がロックウェル硬度HRA80以上もしくはビッカース硬度でHv1000以上であり、切削工具の切削点を一点に固定しつつ、曲率を有する前記転写光学面を切削加工により創成することを特徴とする転写光学面の加工方法。

【請求項4】 光学素子成形用型の転写光学面を構成する材料の臨界押し込み深さが5 μ m以下であり、その転写光学面を切削加工により創成することを特徴とする転写光学面の加工方法。

【請求項5】 光学素子成形用型の転写光学面を構成する材料の臨界押し込み深さが5 μ m以下であり、切削工具の切削点を連続的に移動させながら、曲率を有する前記転写光学面を切削加工により創成することを特徴とする転写光学面の加工方法。

【請求項6】 光学素子成形用型の転写光学面を構成する材料の臨界押し込み深さが5 μ m以下であり、切削工具の切削点を一点に固定しつつ、曲率を有する前記転写光学面を切削加工により創成することを特徴とする転写光学面の加工方法。

【請求項7】 前記転写光学面の形状が非球面であることを特徴とする請求項1～6のいずれかに記載の転写光学面の加工方法。

【請求項8】 前記転写光学面の有効径が5mm以下であることを特徴とす

る請求項 1 ～ 7 のいずれかに記載の転写光学面の加工方法。

【請求項 9】 前記切削加工に用いる工具刃先がダイヤモンドにより構成されていることを特徴とする請求項 1 ～ 8 のいずれかに記載の光学面加工方法。

【請求項 10】 前記切削加工に用いる加工機の切削工具又は前記転写光学面を保持する軸の制御分解能が 1 0 0 n m 以下である超精密加工機を用いたことを特徴とする請求項 1 ～ 9 のいずれかに記載の転写光学面の加工方法。

【請求項 11】 前記切削加工により切削創成された前記転写光学面の形状を測定し、測定した形状と理想形状との偏差を得て、得られた前記偏差に応じて、前記切削加工に用いる切削工具又は前記転写光学面を相対移動させながら、再度切削加工を行うことを特徴とする請求項 1 ～ 10 のいずれかに記載の転写光学面の加工方法。

【請求項 12】 前記偏差に基づいて、ツェルニケの多項式の各項の誤差成分を求め、所定値と比較することで、加工形状の良否判定を行うことを特徴とする請求項 11 に記載の転写光学面の加工方法。

【請求項 13】 前記光学素子成形用型は、前記切削加工を行う加工機の回転軸に取り付けられており、前記加工工程において、前記回転軸より取り外されることなく前記転写光学面の形状を測定可能となっている特徴とする請求項 1 ～ 12 のいずれかに記載の転写光学面の加工方法。

【請求項 14】 前記光学素子成形用型は、プラスチックを素材とする光学素子を成形するための成形用型であり、前記転写光学面は、光学素子の光学面を転写するための面であることを特徴とする請求項 1 ～ 13 のいずれかに記載の転写光学面の加工方法。

【請求項 15】 前記光学素子成形用型は、ガラスを素材とする光学素子を成形するための成形用型であり、前記転写光学面は、光学素子の光学面を転写するための面であることを特徴とする請求項 1 ～ 13 のいずれかに記載の転写光学面の加工方法。

【請求項 16】 少なくとも前記光学素子成形用型における切削加工されるべき前記転写光学面の材料が超硬であることを特徴とする請求項 1 ～ 15 のいずれかに記載の転写光学面の加工方法。

【請求項 17】 少なくとも前記光学素子成形用型における切削加工されるべき前記転写光学面の材料がセラミックであることを特徴とする請求項 1～15 のいずれかに記載の転写光学面の加工方法。

【請求項 18】 切削加工されるべき前記転写光学面のセラミック材料が、炭化珪素であることを特徴とする請求項 17 に記載の転写光学面の加工方法。

【請求項 19】 切削加工されるべき前記転写光学面のセラミック材料が、CVDにより創成された炭化珪素であることを特徴とする請求項 18 に記載の転写光学面の加工方法。

【請求項 20】 前記転写光学面を切削加工後に研磨加工することを特徴とする請求項 1～19 のいずれかに記載の転写光学面の加工方法。

【請求項 21】 請求項 1～20 のいずれかに記載の転写光学面の加工方法に用いることを特徴とする加工機。

【請求項 22】 請求項 1～20 のいずれかに記載の転写光学面の加工方法により形成されることを特徴とする光学素子成形用型。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、転写光学面の加工方法、加工機及び光学素子成形用型に関し、特に小さな光学面の切削加工に適した転写光学面の加工方法、加工機及びそのような光学面を形成できる光学素子成形用型に関するものである。

【0002】

【従来の技術】

ガラスやプラスチックなどの光学材料を用いて光学素子を成形するために、加熱軟化した光学材料を、光学素子の成形用型（以下、金型ともいう）によって形成されるキャビティ内に高圧で射出したり、或いは金型によってプレスして冷却・固化することで、その型が有する転写光学面形状や表面粗さを光学材料に成形転写して光学面を形成し、効率良く光学素子を生産することができる。この転写光学面を有する金型は、加熱された光学材料に高圧で接触するため、耐熱性が十分あること、光学材料が貼り付いたりしないように反応性や濡れ性が低いこと、

硬度が高く傷がつきにくいこと、といった金型としての使用寿命を長く確保するための条件を必要とすると同時に、加工がしやすく生産性が高いことなども、型製作のコストを低減し、結果として光学素子のコストを低下させ効率良い生産性を実現する上で、重要な条件として求められている。

【0003】

従来から、ガラスを素材とする光学素子を成形する金型を製作するには、セラミックや超硬などの耐熱性の高い材料を、図8に示すような加工機の主軸に取り付け、ダイヤモンド砥粒を用いた砥石による研削加工で転写光学面形状に創成加工し、さらにその表面粗さを向上するために、後加工として研磨が行われていた。そうして創成された転写光学面の表面に、ガラスとの融着を防止するために厚さ100nmから1 μ m程度のガラスとの濡れ性の小さい炭素や窒化ボロン、あるいは貴金属などの材料で保護コートを行うことで、金型が製作されていた。これらの金型の転写光学面の製法については、特許文献1～5に一般的に書かれている。金型に用いられるセラミック材料としては表1のようなものがあり、硬度は大半がロックウェル硬度HRA90以上であり大変硬い材料であることがわかる。

【特許文献1】

特開昭52-45613号公報

【特許文献2】

特公平2-1782号公報

【特許文献3】

特公平3-55421号公報

【特許文献4】

特公平3-59016号公報

【特許文献5】

特公平3-61617号公報

【非特許文献1】

精密工学会誌 Vol. 66、NO. 9、2000 小倉一郎と岡崎祐一「シングルポイントダイヤモンド旋削による光学ガラスの延性モード切削加工に関する研

究」

【表1】

セラミック材料名	破壊靱性値 ($\text{MN}/\text{m}^{3/2}$)	ヤング率 (GPa)	臨界押込み 深さ d_c (μm)	硬度 (HRA/HV)
窒化アルミ(AlN)	3.0	310	2.79	89/1000
ジルコニア(ZrO_2)	10.0	210	10.8	91.2/1250
窒化珪素(Si_3N_4)	7.5	310	2.75	93.5/1850
炭化珪素(SiC)	3.2	420	0.31	94/2400
炭化珪素(CVD-SiC)		490		97/2800
アルミナ(Al_2O_3)	4.2	402	1.03	93.6/1900
炭化ボロン(B_4C)				97.5
炭化クロム(Cr_3C_2)	4.0	372	3.44	91/1200
ホウ化チタン(TiB_2)		500		94

【0004】

【発明が解決しようとする課題】

セラミック材料を用いた金型に関し、その問題点についてさらに詳しく述べると、原料の粉体を焼結する際に、常圧焼結であっても高圧焼結であってもその粉体間の隙間が焼結後も残り残留ポアとなるので、研削加工や研磨加工をした際に光学面に微小な孔が生じることがある。この微小孔は、光学素子を成形した際にその光学面に無用な微小凸部すなわち欠陥を生じさせ、また、ガラス材料が金型へ融着する原因となる。そのため、通常は焼結した型材料を研削加工や導電性のセラミックの場合では、特願2002-017122、特願2001-359838にあるような放電加工によって、光学面の荒形状加工を行い、その上に線膨張係数が、ほぼ同じセラミック材料のCVD (Chemical Vapor Deposition) コートを膜厚10 μm から5mm程度まで行って、緻密なセラミック層を設け、このセラミック層に前述した研削加工や研磨加工を施して非球面などの光学面形状を高精度に創成することが行われていた。つまり、セラミックの型材料による光学素子成形用型は、本体は粉体焼結材料であるが、転写光学面部はCVDコートによる緻密なセラミックにしてあるのが一般的であり、このように非常に緻密で

硬度の高いセラミック材料に形状精度 50 nm、あるいはそれ以下で転写光学面形状を創成するには、前述したようにダイヤモンド砥粒を用いた砥石による研削加工で行っており、その加工表面粗さの向上に後加工としてさらに研磨加工を行っていたのである。

【0005】

そして、その光学面にガラスとの離型性を高めるために、ガラスと濡れ性の悪い DLC（ダイヤモンドライクカーボン）や窒化ボロンなどをイオンプレーティングやスパッターにより 1 ミクロン以下の厚みに成膜して、成形に用いていた。

【0006】

セラミック材料の加工難度を示す指標として、ダイヤモンド圧子をセラミック材料に押し込んだときに延性状態から脆性破壊を起こす遷移領域の臨界押し込み深さ dc を計算した値が表 1 に示されている。これは、以下の (1) 式により算出される値で、これ以上圧子を押し込むと材料が脆性破壊するという限界値である。

【数 1】

$$dc = \frac{E}{Hv} \left(\frac{K}{Hv} \right)^2 \quad \dots (1)$$

ここで、 dc ：臨界押し込み深さ (μm)、 E ：ヤング率 (GPa)、 Hv ：ビッカース硬度 (GPa)、 K ：破壊靱性値 ($\text{MPa m}^{1/2}$) である。

【0007】

実際に砥石や切削工具の切れ刃を材料に切り込む際には、臨界押し込み量の数分の 1 にしないと、加工が脆性破壊で進行するため光学鏡面にならないと言われている。つまり、最も臨界押し込み量が多いジルコニアでも、ミクロンオーダーの切れ刃の切り込みが安定して実現できないと鏡面を創成できないし、上述した特許文献で、光学素子成形用型の材料として広く引例されている炭化珪素に至っては、少なくとも 100 nm 程度の切り込み量でないと転写光学面は創成できないことがわかる。このように、これらのセラミック材料に転写光学面を創成加

工することは、極めて低能率で難度の高い加工ということが出来る。このような理由によって、ダイヤモンドなどの切削工具によってたった一つの切れ刃の微小な切り込みで、長時間かけて切削加工によりこれらのセラミック材料に高精度な転写光学面を創成加工するということは、非効率的で工具磨耗も著しく、従来、全く思いもよらないことであったといえる。また、その実例も存在していない。従って従来は、ダイヤモンド砥石などを用いて、たくさんの砥粒の切れ刃によって加工効率を高く維持できる研削加工により転写光学面形状を創成するのが一般的であり、その後、研削加工により生じたスクラッチやびびりマーク（チャッターマーク）を研磨加工で除去して、滑らかな光学表面を創成するのが通常であった。

【0008】

また、超硬材料で光学素子成形用型を創成する場合、比較的入手しやすい超硬材料の汎用グレードに、炭化タングステン（WC）の粒子にコバルトを結合材として10数mol%程度混合して焼結するものがあるが、コバルトは耐熱性が低く高温になると容易に酸化するという特性があるため、ガラス転移点が500℃から600℃の極一般的なモールド用ガラスを成形するための光学素子成形用型の材料としても適していない。また、コバルトの含有量が多いと超硬材料の比重や硬度が減少するが、焼結後の組織構造も疎となるので、転写光学面を研削加工や研磨加工によって創成したときに、表面粗さが向上できない。したがって、転写光学面を形成する材料としては、結合材であるコバルトの含有量は少ない方がよいといえる。また、炭化タングステン（WC）の粒子径は、小さくなると焼結後の組織構造が細くなるので、転写光学面を創成したときの微細な孔（残留ポア）も減少し表面粗さが向上するが、反面、硬度が増し破壊靱性値が低下するので脆性破壊しやすくなり、加工難度が増すという問題がある。

【0009】

また、焼結の際にHIP処理（熱間静水圧プレス）により、アルゴンや窒素ガスによって等方的に加圧して高温焼結すると、焼結に際して粉体間の距離が均一に締め高密度化するので、残留ポアが減少し、転写光学面としたときの表面粗さが向上するが、それに応じて硬度が増大するため、加工難度は更に増す。これ

らの超硬材料の性質を表 2 にまとめた。

【表 2】

WC粒径 (μm)	コバルト量 (mol%)	焼結方法	比重	破壊靱性値 ($\text{MN}/\text{m}^{3/2}$)	ヤング率 (GPa)	臨界押し込み 深さ d_c (μm)	硬度 (HRA/HV)
10	14	ホットプレス (単軸プレス)	13.0				81.5
10	8	ホットプレス (単軸プレス)	14.3	12.6	540	56.4	88/1150
1	5	HIP	15.0				92
0.5	無し	HIP	14.7	6.5	600	1.83	95/2400

【0 0 1 0】

このように、転写光学面材料として適する組成や粒径、処方などを光学素子成形用型に適するように選択していくと、転写光学面用の超硬材料の硬度はどんどん高くなり、結局ロックウェル硬度 H R A 9 0 以上になってしまう。実際に市販されている超硬材料の銘柄で見ると、コバルト含有量が 1 0 数%である富士ダイス（株）製の汎用超硬材料 C 9 5（製品名）ではロックウェル硬度が H R A 8 1. 5 程度だが、特に光学素子成形用型用途に処方された日本タングステン（株）製のコバルトレス超硬材料 R C C - F N（製品名）では、微細化と H I P 処理、無コバルト化によってロックウェル硬度は H R A 9 5 に達する。これらの超硬材料について、ダイヤモンド圧子を押し込んだときに延性領域から脆性領域へ遷移する臨界押し込み深さを、セラミック材料の場合と同様に破壊靱性値やヤング率、硬度などより計算すると、表 2 にあるように、ややコバルト含有量を低減した汎用超硬材料で 5 6. 4 μm あるのに対して、光学素子成形用型用途の超硬材料では 1. 8 3 μm となり、約 1 / 3 0 に低下することがわかる。研削加工や切削加工での切れ刃の切り込み深さは、この押し込み量の数分の 1 にしないと材料が脆性破壊して光学鏡面ならないといわれているので、超硬材料で転写光学面創成を行う場合も、材料を適宜選定すればセラミック材料と同様に 1 μm もしくはそれ以下の非常に微小な切り込み量で低能率に加工せねばならないことが理解できる。

【0 0 1 1】

このように、適宜選択された超硬材料で作られた光学素子成形用型は、非常に

硬く脆性破壊しやすいため加工が難しく、実際に曲率を有する非球面などの転写光学面形状を有するこれらの材料による光学素子成形用型を、単一の切れ刃による切削加工によって高精度に転写光学面を創成加工するという例は無く、そのような発想もなかった。したがって、従来、ダイヤモンド砥石などを用いて、たくさんの砥粒の切れ刃によって加工効率を高く維持できる研削加工による転写光学面創成が一般的であり、その後、研削加工によるスクラッチやびびりマーク（チャッターマーク）を研磨加工により除去して、滑らかな光学表面を創成するのが通常であった。そして、その転写光学面にガラスとの離型性を高めるために、ガラスと濡れ性の悪い白金とイリジウムの合金などをスパッター処理により $1\ \mu\text{m}$ 以下の厚みに成膜し、ガラス光学素子の成形に用いていた。

【0012】

一方、プラスチック光学素子の成形用型では、基材として調質された鋼材やステンレス材料を用い、一般的な汎用旋盤などを用いて転写光学面形状を $10\ \mu\text{m}$ 程度の精度で切削加工し、ブランク型としていた。さらに、その転写光学面上にダイヤモンド切削が可能な無電解ニッケルメッキなどを $100\ \mu\text{m}$ 程の厚みで付着させ、図6に示すような超精密旋盤を用い、更に図7のようなダイヤモンド切削工具を用いて鏡面切削し、転写光学面を創成加工していた。

【0013】

しかし、プラスチック光学素子の成形用型においても、その生産数量が非常に大きい場合は、型の寿命をできる限り長くすることが、型交換などの手間や成形の停止時間を減らし、効率の良い生産を実現するために重要となる。従来、前述した無電解ニッケルメッキなどの型材料は、容易にダイヤモンド切削ができる反面、硬度としてはビッカース硬度で $H_v\ 550$ 程度まで、熱処理を行って結晶化させることで硬度を向上しても、ビッカース硬度で $H_v\ 650$ 程度までであった。更に、プラスチック光学素子の成形では、樹脂材料とその型材料の離型性は比較的良いが、転写光学面に作動油が付着したり樹脂材料がまれに融着したりするため、それらを取り除く作業が必要であり、その拭き取り作業によって型に微細な傷が入ることが多い。

【0014】

また、成形した光学素子を取り出すために、転写光学面を有する型部品がその転写光学面を突き出す摺動部を有する場合には、摺動により型部品に磨耗が生じ、嵌合部にガタを生じることがあった。この嵌合部は、転写光学面が偏心しないように精度良く金型ダイセットに組み込まれた状態を維持するガイドの機能を有する訳であるから、生じたガタは、転写光学面のティルトやシフトなどのズレや偏心を引き起こし、その結果、成形された光学素子の光学面にズレや偏心が転写され、成形された光学素子の光学性能を低下させる恐れがある。これを解決する一手法として、型材料を従来の鋼材やステンレス材料あるいは無電解ニッケルメッキではなく、超硬材料を用いてその転写光学面や摺動部を形成することがあり、それにより傷や磨耗を防ぎ、型を長寿命化することができる。このような超硬材料を用いたプラスチック光学素子の成形用型の場合は、その転写光学面や摺動部の創成加工は、従来、ガラス光学素子の成形用型の場合と全く同様に、ダイヤモンド砥石などを用いた研削加工とその加工表面粗さを向上するための研磨加工を後加工として行っていた。

【0015】

ただし、プラスチック光学素子の成形用型の場合は、プラスチック材料の軟化温度が250℃程度と低く、また超硬材料の型の表面に樹脂材料が貼り付くことはまれのため、転写光学面に離型性の材料で成膜することはほとんど行われていないという実情がある。

【0016】

以上より、セラミック材料や超硬材料からなる転写光学面の加工性を悪化させている大きな要因として、これらの材料の硬度が非常に高く且つ脆性材料であるということがいえる。つまり、硬度が高いために加工効率が非常に悪く、工具の損耗が著しく、その結果、一定の加工条件を安定して保つのが難しいだけでなく、さらには脆性材料であるために、切れ刃の切込みを大きくすると加工が破碎によって進行するので、切り込み量を1 μ m以下の非常に微小な切込みにして、破碎が生じない延性モードで加工を進行させる必要がある。前述したように、どのような工具を用いようともこの延性モードで加工を行わない限り、機械加工によってセラミックや超硬の材料上に転写光学面を創成加工することはできない。

【0017】

従来、このような性質を有するセラミック材料や超硬材料を、研削加工により転写光学面創成を行っていた理由は、切削加工の場合では、例え最も硬いダイヤモンドを切れ刃に使ったとしても、硬度の高いこれらの材料を単一の切れ刃により微小な切り込み量で長時間にわたり切削加工すると、急速に刃先が磨耗して刃先形状が変化するので、所望の転写光学面形状を高精度に創成できない、あるいは、切れ刃の急激な磨耗によって切削力が低下し工具としての機能を果たさなくなると思われていたことによる。また、ダイヤモンド工具は非常に高価であるために、このように簡単に切れ刃を消耗して機能を果たさなくなるとされる切削加工に対して当事者が忌避感を持ち易いことや、ダイヤモンド切削加工に関するほとんどの文献で、「ダイヤモンド切削加工による転写光学面創成に適しているのは、銅やアルミなどの軟質金属と無電解ニッケルメッキだけ」といった内容が書かれており、ダイヤモンド切削加工が超硬やセラミックなどの硬い材料の転写光学面創成には向かないという先入観が作られたことなどによって、実用化に向けて研究することさえ非常識と考えられていた実情がある。

【0018】

例えば、上記非特許文献1では、ガラス光学素子の光学素子成形用型として典型的なセラミック材料である炭化珪素（SiC）の延性モード加工について、光学ガラスのBK7や熔融石英と比較して言及しているが、この結言の中で「BK7は加工しやすいが、SiCおよび熔融石英ガラスでクラックフリーの加工を行うことは難しい」と結論付けている。このような研究論文においてさえも、従来、セラミック材料や超硬材料を切削加工によって転写光学面創成することは得策ではないという考え方が一般的であったのである。

【0019】

また、切削工具では刃先が加工に際してほとんど弾性変形しないので、切れ刃の切り込み量と除去量がほぼ同じとなるため、切削加工で延性モード加工を行うには100nm程度の切込み量を正確に維持できる高精度で剛性の高い高価な超精密加工機が必要となる。しかも、加工機の精度を十分発揮するには設置環境の温度制御や床振動の除去といった、付帯設備の高額化を伴うため、型加工費用の

高額化、結局は成形レンズのコストを押し上げることに繋がる。

【0020】

それに対して、研削加工では砥石の径が大きく加工点が切削に比べて砥石円周上になるため、無数の砥粒の切れ刃によって加工を行い、一つ一つの切れ刃の加工負担が少なく磨耗が少ないこと、たとえ磨耗しても、砥石は回転しているので常に真円の工具として振舞うので、加工面形状に悪影響を与えにくくレンズ性能に高次成分の収差を発生するような大きな異形状に加工され難く、加工に際して砥石が被加工物に押し付けられると弾性変形して凹むため強制切り込みとはならず、砥石にミクロンオーダーの切込みを入れても、砥粒の切れ刃は実質的にその10分の1以下の切り込みとなって、比較的容易に延性モード加工が実現でき、光学鏡面に近い加工面が得られるといった特長がある。

【0021】

このような理由により、セラミック材料や超硬材料に転写光学面を創成加工するには、従来、切削加工ではなく、研削加工とその後加工として研磨加工が常識的に行われてきたのである。

【0022】

確かにこれらの特長は、特に光学素子成形用型の転写光学面が直径で5mm以上の比較的大きい場合にはよく成りたち、超硬やセラミックなどの材料に転写光学面の創成加工を行うには、研削加工が圧倒的に有利であった。しかし、近年、例えば携帯電話などに実装されるマイクロカメラの撮像レンズでは、直径が2mm程度と極めて小径化し、また、光ディスクなどのピックアップ用レンズなどでは、その非球面光学面の中心曲率半径が2mm以下と非常に小さく、しかもその光学面の最大法線角が65度以上になる深い形状も珍しくなくなってきた。これは、切削加工で転写光学面創成を行う場合において、小径化により切削長が短くなるため工具刃先の磨耗はそれほど大きくなりなくなり、適当な補正加工を併用すれば転写光学面の形状精度を十分高く創成できることを意味する。また、外径が小さくなり転写光学面の曲率半径もそれに比例して小さくなってくると、特に加工面形状が凹面の場合では砥石を微小な凹面に入れるために小さくしなければならず、砥石の加工部である円周長も短くなつて切れ刃の負担が増加し、研削比

が急激に低下し始める。つまり、研削加工中に、急速に砥粒の切れ刃の状態が変化して加工再現性が悪くなる、砥石径がすぐ小さくなるので頻繁にその補正を行わなければならない、あるいは、研削の効率を向上し砥石周速を上げるために極めて高速に回転する高価な高周波スピンドルが砥石軸に必要となる、といった難点が生じてきた。

【 0 0 2 3 】

さらに、直径が小さく非常に深い凹転写光学面では、砥石径が小さくなるだけでなく砥石軸も細くせざるを得ないので、砥石軸のたわみ剛性が低下して、型の加工点の位置が不安定に揺らいだり、砥石軸が被加工物の端面に当たるため、砥石軸と型の加工回転軸でもある光軸を直交配置から 4 5 度ほど傾けなければならない、といった問題が生じていた。特に后者では、砥石が加工中に磨耗した際に砥石の加工点が砥石軸の傾き方向へ移動するので、型上での加工点が移動してしまい、加工状態が大きく変化し安定しない。砥石軸と型の加工回転軸が直交配置では、砥石が磨耗しても加工点は大きく移動せず砥石半径が変わるだけであるから、前述したように加工形状にあまり大きな影響を与えない。しかし、最近の光学素子の傾向として、小径小曲率半径の光学素子が増加しているため、このような方式の研削加工の特長を活かせなくなってきたという実情がある。

【 0 0 2 4 】

さらに、転写光学面の曲率半径と砥石半径が近い場合、転写光学面の外周部に成形した光学素子の取り付け基準となる段差などを設けようとする、この部分が研削加工中に工具干渉を発生して、成形用型上に設けることができないことがあった。そのため、光学素子を取り付ける際の基準面がかならずしも成形光学素子の取り付け上最良の位置とはならず、取り付け相手の部品形状に対しても設計上の制約を与えることがあった。

【 0 0 2 5 】

これらの研削加工の最近の課題を一言で言えば、被加工面が小さくなると急速に研削比が劣化し、加工能率が低下することと、砥石の磨耗によって切れ刃や加工状態に再現性が乏しくなり、高精度の転写光学面創成が難しくなるということである。

【0026】

後加工として、転写光学面の表面粗さを向上するために行う研磨加工では、研削加工により生じたスクラッチ状の表面傷をなくすほど研磨加工を行うと、せっかく研削加工により創成した転写光学面形状が崩れることが発生していた。従って、研削加工の後加工としての研磨加工も、従来、再現性の乏しい加工方法であったと言える。

【0027】

本発明は、最近の光学素子の小径化や深面化により、セラミック材料や超硬材料による成形用型の高精度な転写光学面の創成が難しくなってきたことに鑑み、従来全く考案されることがなかった切削加工により、これを創成、実現する転写光学面の加工方法、加工機及びそれにより形成された光学素子成形用型を提供することを目的とするものである。

【0028】

【課題を解決するための手段】

請求項1に記載の転写光学面の加工方法は、光学素子成形用型の転写光学面を構成する材料の硬度がロックウェル硬度HRA80以上もしくはビッカース硬度でHv1000以上であり、その転写光学面を切削加工により創成するので、例えば小径の光学素子を成形するための光学素子成形用型の転写光学面を創成する際に、砥石を用いた研削加工で生じうる上述した問題を回避して、高精度な形状の転写光学面を得ることができる。すなわち、従来における当業者の経験や知識に基づけば、ロックウェル硬度HRA80以上もしくはビッカース硬度でHv1000以上の非常に高い硬度を有する素材を切削して転写光学面を創成するということは、常識に反する行為といえ、これを肯定する文献は、発明者らが確認した範囲で存在しない。本発明者らは、ロックウェル硬度HRA80以上もしくはビッカース硬度でHv1000以上の非常に高い硬度を有する素材を用いて光学素子成形用型の転写光学面を、いかにして精度良く形成するかという困難な課題に直面し、従来の常識にとらわれることなく全ての加工方法を研究し、その結果、例えばダイヤモンド工具を用いて切削加工を行うことで、かかる高い硬度の素材から転写光学面を創成できることを見いだしたのである。しかも、小径の光学

素子を成形するための光学素子成形用型の場合、転写光学面も小径であることから、切削加工を行ったとしても、切削長が短いために一型当たりの刃先の損耗も少なく抑えることができ、従来の常識の一つである刃先損耗の問題も回避できることを、本発明者は見いだしたのである。

【0029】

請求項2に記載の転写光学面の加工方法は、光学素子成形用型の転写光学面を構成する材料の硬度がロックウェル硬度HRA80以上もしくはビッカース硬度でHv1000以上であり、切削工具の切削点を連続的に移動させながら、曲率を有する前記転写光学面を切削加工により創成するので、例えば小径の光学素子を成形するための光学素子成形用型の転写光学面を創成する際に、砥石を用いた研削加工で生じうる上述した問題を回避して、高精度な形状の転写光学面を得ることができる。

【0030】

請求項3に記載の転写光学面の加工方法は、光学素子成形用型の転写光学面を構成する材料の硬度がロックウェル硬度HRA80以上もしくはビッカース硬度でHv1000以上であり、切削工具の切削点を一点に固定しつつ、曲率を有する前記転写光学面を切削加工により創成するので、例えば小径の光学素子を成形するための光学素子成形用型の転写光学面を創成する際に、砥石を用いた研削加工で生じうる上述した問題を回避して、高精度な形状の転写光学面を得ることができる。

【0031】

切削工具としてダイヤモンド工具を用いる場合は、切れ刃に用いるダイヤモンドの結晶方位によって、工具の磨耗量が大きく異なることが知られている。したがって、セラミック材料や超硬の光学素子成形型の転写光学面を切削加工する場合、ダイヤモンドの磨耗が少ない結晶方位だけ用いて切削加工を行うと、工具の磨耗量を減らし工具寿命が長くなるので、多量の成形用型を加工することができる。例えば、2軸の超精密加工機の工具テーブルに旋回軸を設けて、その回転中心軸上にダイヤモンド工具の磨耗量が最も少なくなる(100)面の<110>方位や、(110)面の<110>方位などを刃先の逃げ面やすくい面となるよ

うに製作されたダイヤモンド工具の切れ刃が位置するように取り付けて、加工すべき転写光学面の加工点に常にその切れ刃が位置するように（切削点を一定に固定するように）し、つまり磨耗量が少なくなる結晶方位が常に転写光学面の法線方向となるように同時3軸駆動で切削加工を行うと、工具の磨耗が少なく、長い切削長に渡って切れ刃の形状を良好に維持できるので、工具交換の回数を減らし、その手間と加工機の稼働率の低下を抑制することができる（請求項3及び後述する請求項6）。

【0032】

しかしこの方式では、切削工具の切れ刃の加工点（切削点）を旋回軸中心に精度良く位置させる必要があり、工具セッティングの段取りが複雑で手間がかかるという欠点も有する。非常に高精度な転写光学面の加工においては、それらの段取り上の誤差要因が多くなる以外に、加工機が3軸の可動部を有して同時に駆動されるため、それらの機械精度が全て重畳して加工精度に影響するため、あまり好ましくない。この際に発生する加工形状の誤差はバラツキ誤差成分が多いので、後述する形状補正加工の効果にも限界がある。したがって、前述したようなマイクロカメラ用の光学素子の成形用型のように、要求される面形状精度が100nm以上の比較的緩い転写光学面である場合には、採用すると良い方式である。

【0033】

より高精度の転写光学面を創成する場合には、請求項2及び後述する請求項5に記載のごとく、ダイヤモンド工具の刃先すくい面において、切削点が連続的に移動する2軸動作の超精密旋盤等を用いた方式の方が、加工形状におけるバラツキ誤差が少なく工具磨耗による偏り誤差が主となるので、後述する形状補正加工においてはより効率的に転写光学面を創成できる。

【0034】

請求項4に記載の転写光学面の加工方法は、光学素子成形用型の転写光学面を構成する材料の臨界押し込み深さが $5\mu\text{m}$ 以下であり、その転写光学面を切削加工により創成するので、例えば小径の光学素子を成形するための光学素子成形用型の転写光学面を創成する際に、砥石を用いた研削加工で生じる上述した問題を回避して、高精度な形状の転写光学面を得ることができる。

【0035】

請求項5に記載の転写光学面の加工方法は、光学素子成形用型の転写光学面を構成する材料の臨界押し込み深さが $5\mu\text{m}$ 以下であり、切削工具の切削点を連続的に移動させながら、曲率を有する前記転写光学面を切削加工により創成するので、例えば小径の光学素子を成形するための光学素子成形用型の転写光学面を創成する際に、砥石を用いた研削加工で生じうる上述した問題を回避して、高精度な形状の転写光学面を得ることができる。

【0036】

請求項6に記載の転写光学面の加工方法は、光学素子成形用型の転写光学面を構成する材料の臨界押し込み深さが $5\mu\text{m}$ 以下であり、切削工具の切削点を一点に固定しつつ、曲率を有する前記転写光学面を切削加工により創成するので、例えば小径の光学素子を成形するための光学素子成形用型の転写光学面を創成する際に、砥石を用いた研削加工で生じうる上述した問題を回避して、高精度な形状の転写光学面を得ることができる。

【0037】

請求項7に記載の転写光学面の加工方法において、前記転写光学面の形状が非球面であると、それから転写形成された光学素子の成形光学面の収差特性を良好なものとなる。

【0038】

請求項8に記載の転写光学面の加工方法において、前記転写光学面の有効径が 5mm 以下であると、砥石による研削加工は困難となり、又切削長が短くなることから、切削加工の利点を得やすい。

【0039】

ここで、切削加工において、平面形状が円の転写光学面を加工するときの切削長について考察する。切削工具が、回転する転写光学面の外周から切り込まれ、中心に向けて一定速度で進み、中心に至った瞬間、離れることで創成される切削跡（ひき目）はアルキメデスの螺旋形であるから、主軸回転数を s 、工具の送り速度を f とすると、単位角度当りの送り量 F は、以下の式で表せる。

$$F = f / 2 \pi s \quad (2)$$

【0040】

更に、切削すべき転写光学面の半径を R とし、切り込んでからの回転角を e とおくと、切削中の刃先の転写光学面中心からの位置 r は、以下の式で表せる。

$$r = R - F \theta \quad (3)$$

【0041】

ここで、切削工具の刃先が転写光学面中心に来たときは $r = 0$ となり回転角の最大値 θ_{max} は、以下の式で表せる。

$$\theta_{max} = R / F \quad (4)$$

【0042】

全切削長 S は、以下の式で表せる。

【数2】

$$S = \int_0^{\theta_{max}} r d\theta = \int_0^{R/F} (R - F\theta) d\theta = \frac{R^2}{2F} = \frac{s\pi R^2}{f} \quad \dots\dots\dots (5)$$

【0043】

上記(5)式によれば、切削長 S は、主軸回転数 s や送り速度 f の切削条件が同じであれば、加工すべき転写光学面の面積に比例することがわかる。つまり、加工すべき転写光学面の径が $1/2$ になれば切削長は $1/4$ になり、加工すべき転写光学面の径が $1/3$ になれば切削長は $1/9$ になる訳で、加工すべき転写光学面が小径になることにより、切削工具の磨耗量は急激に減少することが理解できる。従来、カメラやビデオカメラ用撮像レンズなどでは、直径 $10 \sim 15 \text{ mm}$ 程度のレンズが主流であったが、近年、携帯電話などに搭載するマイクロカメラなどの撮像レンズでは、直径 4 mm 程度、さらに最近では 2 mm 程度のものも珍しくない。つまり、光学素子としてこれらのレンズを成形する光学素子成形用型の転写光学面の創成加工において、切削加工で行った場合、前者では従来の $1/9$ 程度、後者では $1/50$ 程度に切削加工における磨耗量が減少することを意味するのである。したがって、セラミック材料や超硬材料などの難加工材料からなる成形用型であっても、切削加工により工具磨耗が十分少ない状態で、再現性の

良い高精度な転写光学面の創成加工が実現できるようになるのである。まさに本発明者はこの点に着目し、このような難加工材料の成形用型上に、従来の研削加工と研磨加工によってではなく切削加工により、高精度に転写光学面創成を行うことを思いついたのである。

【0044】

従来の、直径10～15mmの一般的なガラス光学素子では、セラミック材料や超硬材料によるその成形用型の転写光学面を切削加工すると、一面につきダイヤモンド工具2本を消耗した。最初の1本は、粗加工用として刃先が磨耗しても繰り返し使うとすれば、仕上げ加工用の1本が常に消耗される。したがって、およそ直径5mm以下の光学素子であれば、通常の生産1ロット分に相当する6本の転写光学面を工具交換を行わずに切削加工できることになり、現状の研削加工による転写光学面加工時間と比較して、優位性を期待できる。

【0045】

請求項9に記載の転写光学面の加工方法において、前記切削加工に用いる工具刃先がダイヤモンドにより構成されていると、ロックウェル硬度HRA80以上もしくはビッカース硬度でHv1000以上の材料の切削加工を有効に行えるので好ましい。

【0046】

請求項10に記載の転写光学面の加工方法において、前記切削加工に用いる加工機の切削工具又は前記転写光学面を保持する軸の制御分解能が100nm以下である超精密加工機を用いると、高精度な転写光学面の創成が可能となる。

【0047】

図6に示した超精密加工機は、軸分解100nm以下である2軸の正面旋盤で、主軸はエアスピンドルにより極めて滑らかに回転し、そのヘッド面に被加工物である光学素子成形用型を保持してNRRO (Non Repeatable Reading Out：非繰り返し誤差) で10nm程度で回転させることができる。工具台にはダイヤモンド工具を設置して、2軸の動きにより切れ刃を切り込んで旋削を行う。通常の加工機と異なる点は、サブミクロンの微小切り込みによる延性モードの切削が安定して行えるように、軸の運動精度が非常に高いこ

とである。したがって、ここでは超精密加工機は正面旋盤の形態であるが、本発明の範囲は正面旋盤に限らず、軸制御分解能が100nm以下である加工機全てを含む。

【0048】

請求項11に記載の転写光学面の加工方法において、前記切削加工により切削創成された前記転写光学面の形状を測定し、測定した形状と理想形状との偏差を得て、得られた前記偏差に応じて、前記切削加工に用いる切削工具又は前記転写光学面を相対移動させながら、再度切削加工を行うと、高精度な転写光学面の創成が可能となる。

【0049】

硬度が高く臨界押し込み深さが浅い難加工材料であるセラミックや超硬の材料を延性モードで切削加工する際に、小径の転写光学面であれば切削長が短いので刃先の損耗が小さいうちに加工を終えられることを前述した。しかし、高精度な光学素子を成形する成形用型の転写光学面加工の場合は、工具刃先形状が損耗により変わることによって発生する加工形状誤差を無視できない。

【0050】

この場合は、切削加工した転写光学面形状を適当な形状測定器により測定し、転写光学面の断面形状と理想形状との誤差を求め、そのほぼ同じ量を次の切削加工で工具の切り込み量を調節することにより補正して形状創成すると、高精度な転写光学面を得られる。これは、切削加工の場合は、切れ刃の切り込み量がほぼ除去厚みに等しいので、形状誤差量を切り込み量に重畳することで、補正加工が再現性よく実現できるからである。このような形状補正加工を実現するには、形状測定器とそれにより明らかとなった形状誤差を点列のデータとしてパソコンなどに取り込み、後述する演算を行って形状補正量を求め、超精密加工機を駆動するためのパートプログラムに重畳して、新規のパートプログラムをパソコンから出力するようにすれば、比較的簡単に実現できる。超精密加工機の軸動作で形状補正加工を行わずに、別のアクチュエーターなどで工具や被加工物である成形用型を駆動する場合は、パートプログラムを作り直す必要はなく、本来の軸動作と同期をとりながらそのアクチュエーターを動作させて工具の切り込み量を制御

するしくみがあれば良い。

【0051】

ここで重要なのが、この本来の切り込み量に重畳する形状補正量が大きくならないようにすることと、形状補正量に急激な変化がなくなだらかに連続していることである、前者の場合は、せっかく延性モード切削によって創成した転写光学面が、切れ刃の切込み量が臨界押し込み深さを越えて脆性破壊を発生し、加工された転写光学面の鏡面性が失われるだけでなく、工具の切れ刃もその際にチッピングを発生して光学鏡面を創成できなくなるからである。これを防ぐには、形状補正量を重畳しても切れ刃が臨界押し込み深さ以上とならないように、リミッター値を設けて大小関係を判別しながら切り込み量を調整することである。また、後者の場合は、工具の切れ刃が転写光学面を叩くように動くと、その振動により工具の切れ刃が欠けたり加工中に転写光学面が脆性破壊することがあるので、形状誤差や形状補正量を多項式などで近似し関数化して連続とし、その微分値が転写光学面の径方向のどの部分でも、やはりリミッター値を越えないようにそこで飽和させるようにすることで回避できる。また、形状補正量の関数化が難しく点列のまま扱う場合は、隣接する形状補正量を数点ずつ平均化してなだらかにし、隣接する点との形状誤差や形状補正量の差があるリミッター値を越えないように判別しながら重畳すれば、急激な切れ刃の動きを避けられる。また、その平均化された形状補正值そのものも、臨界押し込み深さなどのリミッター値を越えないように判別すれば、切削加工中に切れ刃の切り込み量が臨界押し込み深さを越えて転写光学面が脆性破壊することを防ぐことができる。

【0052】

本発明のセラミック材料や超硬材料の成形用型に、高精度な転写光学面を切削加工により創成するのに、このような切込み量の制限を加えた形状補正加工を行うことにも特徴がある。

【0053】

請求項12に記載の転写光学面の加工方法は、前記形状誤差（例えば測定した形状と理想形状との偏差に対応する）に基づいて、ツェルニケの多項式の各項の誤差成分を求め、所定値と比較することで、加工形状の良否判定を行うと、以下

の理由により好ましい。

【0054】

セラミックや超硬を材料とする成形用型に、高精度な転写光学面を切削加工により創成するのに、切り込み量の制限を加えながら、形状誤差に比例した切り込み量を重畳することで、形状補正加工を行うことを前述した。また、この形状補正加工において、形状誤差または形状補正量を関数化することを述べた。通常、光学素子の波面収差などの円形開口の変化量をフィッティングするのには、ツェルニケの多項式が用いられる。これは、以下の(6)式に示すような極座標で表した一種のフーリエ展開で、光学面の中心(光軸)に対して軸対称な成分や光軸周りの回転で周期性を持つ成分などに直交展開して近似を行うもので、その成分の大きさにより変化量の特徴を表現することができる。

【0055】

切削工具の磨耗によって発生した形状誤差は、旋削の場合は軸対称に形状誤差が発生しているから、転写光学面の断面形状測定によりその断面形状誤差を求め、その断面誤差が軸対称に発生しているとみなして、ツェルニケの多項式の半径方向座標Rのみによって変位量が表される軸対称成分のみを使って、近似フィッティングを行う。切削加工の場合は、比較的緩やかに形状誤差が発生するので、以下に示す7次までの成分だけでほぼ良好に近似できる。

【0056】

1 次の軸対称係数: $\sqrt{3} (2R^2 - 1)$

3 次の軸対称係数: $\sqrt{5} (6R^4 - 6R^2 + 1)$

5 次の軸対称係数: $\sqrt{7} (20R^6 - 30R^4 + 12R^2 - 1)$

7 次の軸対称係数: $3 (70R^8 - 140R^6 + 90R^4 - 20R^2 + 1)$

(6)

【0057】

このようにして関数近似した形状誤差を、1対1で工具切れ刃の切り込み量に対応付けて補正加工する場合は、形状誤差が切り込み量が少なくなる方向であれば、深く切り込む方向に反転して、加工の軸動作のプログラムにその補正量を重畳する。もしその形状補正量が、例えば臨界押し込み深さなどのリミッター値を

越えている場合は、最大でもそのリミッター値となるように形状補正量を修正する。したがって、形状補正量が大きい、言い換えれば形状誤差が大きかった部分は、複数回の形状補正加工に分けて漸次補正されていくことになる。つまり、形状補正加工を行う前に、出来る限り加工面の形状誤差を少なくしておくことが、形状補正加工の回数を少なくし、効率の良い高精度な転写光学面形状を創成する上で重要である。

【0058】

また、形状の測定において、加工する転写光学面の形状誤差が断面形状ではなく、転写光学面全面に渡って得られる場合は、ツェルニケの多項式の7次までの全ての成分を使用して近似フィッティングを行っても良い。このようにして形状補正加工を行うと、高精度な転写光学面形状をセラミック材料や超硬材料の成形用型の上に切削加工で効率よく創成することができる。

【0059】

請求項13に記載の転写光学面の加工方法は、前記光学素子成形用型は、前記切削加工を行う加工機の回転軸に取り付けられており、前記加工工程において、前記回転軸より取り外されることなく前記転写光学面の形状を測定可能となっていると好ましい。

【0060】

従来の研削加工や無電解ニッケルメッキなどの軟質材料の切削加工においては、成形用型を加工機に取り付けたまま加工して転写光学面の形状測定を行うと、測定中は加工ができず加工機が占有されてしまうため、加工機の実質的な稼働率が低下する。したがって、通常は転写光学面の形状測定を行う際には、成形用型を加工機からはずして、別の設置された形状測定器によって加工形状を測定し、その間に加工機には次の成形用型を取り付けて加工を進めるとというのが、効率の良い加工方法であった。実際、従来の研削加工や切削加工では、切れ刃の切り込み量が大きく $1\mu\text{m}$ 以上であるため、成形用型を加工機からはずして形状測定した後、また加工機に取り付けても、時間も20秒程度で偏心を $1\mu\text{m}$ 程度に抑えられるため、加工の効率を下げる要因とはならなかった。言い換えれば、従来、加工機上で成形用型をはずさずに加工形状測定を行うために加工機に形状測定器

を設置したものが市販されていたが、このような理由で実用的にはほとんど意味のないものであった。

【0061】

本発明の加工においては、工具切れ刃の切り込み量が極めて小さい延性モードにより切削加工を行っているから、被加工物である成形用型を測定のためにいちいち加工機からはずすと、再度形状補正加工を行うため成形用型を加工機に取り付ける際の偏心が生じる恐れがあり、それにより光学転写面の加工効率低下などの支障をきたす恐れがある。特に深い転写光学面を有する成形用型の場合は、1 μm 程度の取り付け偏心があっても延性モードを実現する切り込み量の数倍もあるため、少なくとも数回は切り込み量の偏りをなくすために無駄な切削加工を行わなければならない。したがって、本切削加工においては、可能な限り成形用型は取り付けたままで形状補正加工を行うのが、効率の良い高精度な転写光学面創成を実現する上で重要である。すなわち、成形用型を加工機に取り付けた状態で加工面の形状測定を行えるように、加工機上に形状測定器を設置すると良い。

【0062】

以上をまとめると、セラミック材料や超硬材料の成形用型に高精度な転写光学面を切削加工する上で、成形用型をはずすことなく機上で切削加工形状の測定を行って、その形状誤差をもとにして延性モードが成り立つ工具切れ刃の切り込み量に調整した形状補正量を求め、補正形状加工を行うと、加工時間が短く工具の転写光学面加工本数も増加させる、効率の良い転写光学面形状創成が実現できる。また、形状誤差や形状補正量の近似フィッティングにツェルニケの多項式を用いて、その成分ごとの係数値で補正加工を行うと、補正の効果や成形された光学素子の光学性能に及ぼす影響などを推し量ることができ、有益である。このような測定器としては、例えば加工した光学転写面にレーザ光を照射して、その反射光により転写光学面形状を測定する測定器や、触針式で加工機の軸動作によって加工した転写光学面を倣い測定する測定器が利用できる。

【0063】

請求項 14 に記載の転写光学面の加工方法において、前記光学素子成形用型は、プラスチックを素材とする光学素子を成形するための成形用型であり、前記転

写光学面は、光学素子の光学面を転写するための面であると好ましい。

【 0 0 6 4 】

請求項 1 5 に記載の転写光学面の加工方法において、前記光学素子成形用型は、ガラスを素材とする光学素子を成形するための成形用型であり、前記転写光学面は、光学素子の光学面を転写するための面であると好ましい。

【 0 0 6 5 】

請求項 1 6 に記載の転写光学面の加工方法において、少なくとも前記光学素子成形用型における切削加工されるべき前記転写光学面の材料が超硬であると好ましい。

【 0 0 6 6 】

請求項 1 7 に記載の転写光学面の加工方法において、少なくとも前記光学素子成形用型における切削加工されるべき前記転写光学面の材料がセラミックであると好ましい。

【 0 0 6 7 】

請求項 1 8 に記載の転写光学面の加工方法において、切削加工されるべき前記転写光学面のセラミック材料が、炭化珪素であると好ましい。

【 0 0 6 8 】

請求項 1 9 に記載の転写光学面の加工方法において、切削加工されるべき前記転写光学面のセラミック材料が、CVDにより創成された炭化珪素であると好ましい。

【 0 0 6 9 】

請求項 2 0 に記載の転写光学面の加工方法において、前記転写光学面を切削加工後に研磨加工すると、前記転写光学面の仕上げを良好に行える。尚、前記転写光学面を、切削加工する前に荒研削加工することは任意である。

【 0 0 7 0 】

請求項 2 1 に記載の加工機は、請求項 1 ～ 1 8 のいずれかに記載の転写光学面の加工方法に用いると好ましい。

【 0 0 7 1 】

請求項 2 2 に記載の光学素子成形用型は、請求項 1 ～ 1 8 のいずれかに記載の

転写光学面の加工方法により形成されると好ましい。

【0072】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施の形態につき、図面を参照して説明する。本発明の実施の形態にかかる転写光学面の加工方法は、図6の超精密加工機により実行することができる。図6において、不図示の制御装置によってX軸方向に駆動されるX軸テーブル2が、台座1上に配置されている。X軸テーブル2上には、図7に斜視図を示すダイヤモンド工具3が取り付けられている。又、不図示の制御装置によってZ軸方向に駆動されるZ軸テーブル4が、台座1上に配置されている。Z軸テーブル4上には、不図示の制御装置によって回転駆動される主軸（回転軸）5が取り付けられている。主軸5は、加工すべき転写光学面を有する光学素子成形用型（図6で不図示）を取り付け可能となっている。切削工具であるダイヤモンド工具3は、その先端にダイヤモンドチップ3aを取り付けている。

【0073】

本実施の形態にかかる転写光学面の加工方法によれば、主軸5やX・Z軸テーブル2、4の剛性が非常に高く、軸制御分解能が100nm以下の超精密加工機を用いて、主軸5に被加工物であるところの光学素子成形用型を取り付け、ダイヤモンド工具3により、切れ刃の切削点が加工中に連続的に移動するようにして、延性モードで切削加工することにより、非球面形状などの曲率を有する転写光学面を創成することができる。平面のように曲率を有しない面では、複数の軸動作を行う必要がなく、単軸の加工機により平バイトで比較的容易に延性モード切削が行えるので、形状創成としては難度が低く、また成形された光学素子の利用度も低いので、本実施の形態の効果は薄いといえる。本実施の形態は、特に硬度が高く破壊靱性値が小さい超硬材料やセラミック材料などの難加工材料に、非球面形状などの曲率を有する転写光学面を高精度に創成する場合に、以下の実施例で明らかなように大きな効果がある。

【0074】

（実施例1）

表3に示した非球面光学面係数を有し、図1に示す外形状を有する光学素子の

成形用型の転写光学面加工を、本実施の形態の加工方法により実施した。この非球面光学面の成形用型上における形状は、図 1 からわかるように深さが有効径の半分よりも大きく、半球よりも深い凹面形状である。

【表 3】

光学有効径	Φ3.0mm
深さ	凹 1.62mm
中心 R	1.22121

円錐定数k	-0.682735
A4 項	0.175154×10^{-1}
A6 項	0.240932×10^{-2}
A8 項	0.204531×10^{-2}
A10 項	0.653289×10^{-3}
A12 項	-0.48930×10^{-3}
A14 項	-0.827296×10^{-4}
A16 項	0.149693×10^{-3}
A18 項	0.330066×10^{-4}
A20 項	-0.275518×10^{-4}

【0 0 7 5】

まず、粉末焼結した S i C の型材料の転写光学面となるところに、転写光学面の近似球面形状に研削加工で荒取りし、CVD-S i C を厚み 5 0 0 μ m で成膜して、緻密な光学面素地を形成する。この CVD-S i C 面に、表 3 に示す数値で表される非球面光学面形状をダイヤモンド砥粒をニッケル電着した砥石を用いて、軸分解能が 1 0 0 n m 程度の汎用的な高精度加工機により、荒取り研削加工を行い、形状精度 1 μ m まで非球面光学面形状を創成した。当然のことながら、この研削加工は延性モードではないから、加工面の表面粗さは R z 1 ~ 2 μ m 程度であり、光学鏡面とはならない。しかし、ダイヤモンド工具による仕上げ切削加工の前加工段階としては、電着砥石を用いているので、非常に小さな砥石径が

容易に製作できることと、ダイヤモンド砥粒の大きさは#1000以下でかなり大きめであり、しっかりと電着固定されているので切れ刃は安定しており、加工中に容易に状態が変化することはない。したがって、同一設定のまま次々に成形用型のブランクを同じ品質で荒取り研削加工していくことができ、短時間で多量の成形用型の非球面形状光学面の荒取り加工ができる。この実施例の場合では、段取り工程を含めて荒取り研削加工時間は30分であった。

【0076】

次に、荒取り創成された非球面光学面形状を、図6で示したごとく、軸分解能1nmで主軸剛性1000N/ μ m、スライドテーブル剛性1000N/ μ mの高剛性超精密2軸旋盤により、主軸5に成形用型を取り付け、図7に示したダイヤモンド工具3を用いて、延性モード切削により転写光学面を仕上げ加工した。主軸回転数は1000rpm、工具切れ刃のすくい面半径は0.5mm、切り込み量は100nmで、送り速度は0.2mm/minで行った。1回の切削時間は約10分で、10回行った時点で荒取りの研削加工面が除去でき、光学鏡面を創成できた。この時点で、加工面の形状を測定し、理想形状からの誤差を出し、それを補正するように工具の切り込み量を加工場所によって連続的に増減する補正加工を行った。具体的には、転写光学面の形状測定において測定された誤差量を、光学素子の波面収差解析で一般的に使われているツェルニケの多項展開式により、連続する多項式でフィッティングして形状誤差を表現し、この各項の係数値を求める。おおよそ9次程度の次数まで係数値があれば十分な精度で誤差形状は表現できるので、この係数値による誤差量と同じ大きさで方向は逆の軸動作を加工機のNCプログラムに重畳し、切り込み量が連続的に誤差を補正するように工具の切り込む量を補正し加工を行った。この補正概念は、前述したように工具刃先がほとんど弾性変形しない切削加工においては、切れ刃の切り込み量と除去深さがほぼ1対1で対応することを利用しており、極めて再現性の高い補正方法である。この形状補正加工の一連の時間は1回当たり15分かかり、4回行った時点で加工転写光学面の形状誤差が図2に示すように50nm以下になり、所望の公差に入ったので切削加工を完了した。

【0077】

図 2 の切削加工面の非球面形状測定結果は、横軸が転写光学面の径方向の座標を示し、中央が非球面形状の光軸位置であり、縦軸は理想形状に対する形状誤差量を表し、ゼロに近いほど理想形状に近いことを表している。形状測定結果のグラフが 2 本あるのは、転写光学面の中心を通り直交する 2 方向から転写光学面を測定した結果を同時に表示したためで、これにより加工形状に非軸対称な誤差成分がほとんどないことがわかる。この結果からわかるように、加工形状誤差は最大で 5 0 n m 未満であり、十分高精度に非球面光学面形状を創成できたことがわかる。

【 0 0 7 8 】

図 3 は、この転写光学面の表面粗さを測定したもので、 $R_z 12.99 \text{ nm}$ という非常に良好な鏡面性を示しており、このままでも十分成形用型の転写光学面として使える。しかし、深さ 2 n m 程度の周期的なカッターマークが見られるので、ダイヤモンドコンパウンドによって 5 分ほど手作業で研磨し、これを除去した。その研磨後の形状測定結果が図 4 に示され、表面粗さが図 5 に示されている。非球面形状は軸対称性を保ち、全く形状崩れが発生しておらず、表面粗さは $R_z 15.43 \text{ nm}$ とわずかに劣化した。しかし、カッターマークは完全に消失しており、均一な表面粗さとなっているのがわかる。このことから、本発明の切削加工では、極めて短時間の研磨で加工形状を崩すことなく $R_z 15 \text{ nm}$ 程度の表面粗さを容易に達成でき、研削加工のように数 1 0 0 n m から $1 \mu \text{m}$ 近い深さのスクラッチやチャッターマークを研磨で除去する場合と全く研磨形状が異なることがわかる。

【 0 0 7 9 】

このように、表 1 のセラミック材料の中でも最も臨界押し込み深さが小さく（加工点が脆性破壊しやすい）加工難度が高いと思われる炭化珪素を材料とした光学素子成形用型の転写光学面であっても、本発明の切削加工によって短時間に高精度な非球面形状と表面粗さが実現できた。

【 0 0 8 0 】

ところで、この C V D による炭化珪素材料に従来どおり研削加工によって転写光学面を創成したらどうなるかを検討する。この凹転写光学面の中心 R は表 3 に

あるように 1. 2 2 1 2 1 mm である。つまり、転写光学面の中心部を研削加工するには、砥石半径が 1. 2 2 1 2 1 mm より十分小さくしなければならない。したがって、砥石直径は 2. 4 mm 程度が最大である。研削加工では、切れ刃が被削材料に十分切り込んで効率よく除去加工を行うために、被加工物に対して砥石がある程度高速に当たる必要があり、転写光学面創成での一般的な加工周速度は 5 0 0 m / m i n 以上が必要である。直径 2. 4 mm の砥石がこの条件を満たすには、6 6 0 0 r p m の回転が必要であり、高価な高周波スピンドルを要する。つまり、成形用型をその光軸まわりに回転させ、砥石を高速回転して当てることにより研削加工を行うわけであるが、加工する面の形状は前述したように半球よりも深い凹形状であるので、型の回転軸に対して、研削砥石軸が直交している配置では、砥石軸をどれほど細くしても転写光学面の周辺が当たってしまう。そのため、研削砥石軸は型の回転軸に対して斜めに角度を持つ配置しか許されない。この配置では、砥石磨耗により型上での加工点が光軸から外れるので、型の中心部が加工されずに残ってしまう。わずか直径 2. 4 mm の砥石を 6 6 0 0 0 r p m で回転させて、セラミック材料の中でも極めて硬い C V D 炭化珪素の型材料に 1 0 0 n m の切り込み量で加工すると、砥石は簡単に磨耗して砥石半径を変えるだけでなく、型上の加工点も移動するので、極めて煩雑な補正を随時行いながら形状創成加工を行わなければならない。しかも、砥石が小さいので研削状態が安定せず、このような補正加工の効果も明瞭に表れない。

【0 0 8 1】

実際にこのような条件で、図 8 に示す光学面研削装置を用いて、非球面光学面形状の創成加工を行った状況を以下に示す。砥石は、砥粒にダイヤモンドを使うが、結合材はレジンではほとんど砥石寿命が期待できないので、メタルボンドとした。

【0 0 8 2】

まず、砥石を固定する砥石軸の直径が、砥石直径が 2. 4 mm と小さいため 1. 5 mm 程度までしか太くできなかった。そのため、研削加工中に容易に砥石軸が研削抵抗でたわみ、加工表面をたたくような振動を発生して、加工表面に無数のチャッターマークが発生した。また、砥石の切れ刃の状態が安定せず、比較的

良好に研削できている状態が1~2回程度しか連続しなかった。そのため、単石ダイヤモンドによる砥石の目立てを行うが、それにより砥石直径がすぐに小さくなってしまったため砥石の寿命が非常に短く、一つの型加工において4回砥石を交換した。また、砥石磨耗による加工点の移動により型中心部に未加工部（へそ）が発生したので、そのへその直径から加工点の移動量を割り出して補正し、加工点が型中心を通るようにしたがへそは必ずしも消失せず、補正加工そのものの再現性が乏しかった。結局、12時間かけて研削加工を行った結果、加工面の形状精度は240 nm、表面粗さは $R_z 126$ nmであり、表面には無数のチャッターマークとスクラッチがあった。スクラッチについては、砥石をメタルボンドとしたため、砥石の弾性変形量が小さく、強制切込みに近い状態であったことが要因と思われる。このままでは、転写光学面として使用するには品位が低すぎるので、研磨加工を行った。研磨加工時間は、ダイヤモンドコンパウンドを用いて手作業で行い、48分でチャッターマークとスクラッチが除去できたが、研磨加工後の転写光学面形状に50 nm程度の非回転対称の形状崩れが認められた。

【0083】

このようにセラミック材料や超硬材料からなる光学素子成形用型に、小径で深い転写光学面形状を創成する場合、従来の研削加工は全く不適當であり、切削加工に対する優位性は全くないといえる。

【0084】

（実施例2）

緒元を表4に、断面形状を図9に示すガラス製の光学素子を試作した。これはSIM (Solid Immersion Mirror) と呼ばれる、近接場光を用いてNA (Numerical Aperture) が1以上の集光力を実現し、極めて小さなスポットによって高密度に光記録を行うための対物光学素子である。この光学素子については、公知文献などにより詳しく述べられているので、詳細は省略する。平行光が入射する第1面S1は、表5に示す凹非球面形状で、この外周に表6に示す凹反射非球面S3がある。まず、第1面S1を通過して発散した光束は、反射コートを施した平面である第2面S2で反射され、更に反射光が第3面S3によって反射し、第2面S2の中央上に集光されるが、第

2面S2の反射コートは、その中心部には施されておらず、よって第3面S3から反射集光された光束は透過し、この光学素子から出射するようになっている。

【表4】

レンズ外形	Φ1.3mm
NA	1.3
中心ブロッキングNA	0.3
使用波長	660nm

【表5】

第1面有効径	0.18mm
最大法線角	52.4°
中心 R	-0.10237
円錐定数k	-0.243819
A4 項	0.663334×10^{-1}
A6 項	-0.169955×10^{-3}

【表6】

第3面内側有効径	Φ0.22mm
外側有効径	Φ1.15mm
最大法線角	38.3°
中心 R	0.9039100
円錐定数k	-0.6625×10^{-1}
A4 項	-0.109298×10^{-1}
A6 項	-0.989849×10^{-2}
A8 項	-0.44705×10^{-2}
A10 項	-0.325803×10^{-1}

【0085】

このガラス製の光学素子を成形する成形用型を炭化珪素材料で製作した。第2面S2は平面であるので、焼結炭化珪素材料の転写光学面を汎用研削盤により平面研削した後に、CVDにより炭化珪素を300ミクロンの厚みで緻密に成膜し

た。さらに、汎用平面研削盤により直径250mmの#2000のダイヤモンド砥石により周速1500m/minでCVD炭化珪素面を平面研削し、さらにダイヤモンド砥粒を用いて荒研磨した後、さらにコロイダルシリカを用いて精密平面研磨加工を行い、転写光学面を創成した。転写光学面形状が平面の場合は、大きな直径の砥石が使えるため、砥石の粒度や集中度、加工条件を適切に選択し、その後の研磨加工も適切に行うことで、十分効率の良い形状創成ができる。また、後加工である研磨でも形状創成ができるので、本発明の切削加工をあえて行う必要はなかった。

【0086】

成形用型上で凸非球面である第1面S1と凹非球面である第3面S3は、曲率が全く反対なので個々に分割して製作し組み込む方が、一見容易に見える。しかし、第1面S1と第3面S3の偏心公差は、コマ収差の発生を20mλ以下に抑えるため1μm以下と非常に厳しく制限され、それぞれの光軸と外径との同軸度や勘合隙間による偏心などを考慮すると、個別に分割して製作したのでは同軸度公差を満たすのが難しい。

【0087】

従って、連続した一 부품の成形用型上に第1面S1と第3面S3に対応する転写光学面を同時加工し、転写光学面間の同軸度をほとんどゼロにして製作するのが有利である。そこで、第1面S1と第3面S3に対応する転写光学面を、加工機に取り付けたまま、従来の研削加工で同時加工することを考えてみると、第1面S1に対応する転写光学面と、第3面S3に対応する転写光学面の接続部は、極めて狭い奥部となっているため、工具が十分小さくないとこの奥部に入り込めず加工できないという問題がある。第1面S1の有効径はΦ0.18mmであり、第3面S3の最も内側の転写光学面端はΦ0.22mmである。

【0088】

これに対応する部位に砥石を配置してそれぞれの転写光学面を加工する状態を図10に示す。工具干渉を発生しない砥石の直径は、わずか32μmである。砥粒の大きさを小さくしても、数10個程度しか外周上に並ばない。また、これを回転する砥石軸径は、少なくともφ20μm以下である必要があり、砥石周速5

0.0 mm/min を確保するのに必要な砥石回転速度は 5,000、000 rpm に達する。このような研削条件を実現することも、ましてや CVD 炭化珪素の成形型を加工することも不可能である。

【0089】

また、このように小さな転写光学面では、仮に研削加工ができたとしても、加工によって生じるスクラッチやチャッターマークは相対的に大きなものとなるので、十分研磨加工によって除去する必要がある。しかし、研磨加工はそもそも面に倣いながら面全体を平均的に圧力除去加工するものであるから、緩やかな連続面を大きな研磨工具で研磨加工することが、転写光学面形状を崩さずに研磨を進行させる上で重要となる。しかし、本実施例では転写光学面が小さいだけでなく、第 1 面 S1 に対応する転写光学面は凸形状で、第 3 面 S3 に対応する転写光学面は凹形状であり、それらが不連続で接続しているため、均一な研磨加工を行う条件から極めて乖離しており、容易に形状崩れを生じる転写光学面形状といえる。例えば、第 1 面 S1 に対応する転写光学面を研磨する際、その有効径まで研磨するには研磨工具の大きさが数 10 ミクロンオーダーの大きさでなければならず、このように小さな研磨工具では転写光学面に倣う効果は乏しく、転写光学面全体に圧力除去を平均化し均一に実現することは極めて難しい。また、第 1 面 S1 に対応する転写光学面を研磨加工中に、第 3 面 S3 に対応する転写光学面に研磨工具が触れては、この転写光学面の特定箇所が研磨加工されて形状が崩れることになるので、研磨工具の動かし方にも細心の注意が必要である。

【0090】

以上から明らかなように、従来の研削加工と研磨加工により本実施例の成形用型の転写光学面形状を創成することは、極めて再現性に乏しく難しいことがわかる。

【0091】

本発明者らはこれらを鑑み、本発明のダイヤモンド工具による切削加工によりかかる転写光学面を創成した。使用したダイヤモンド工具は、刃先すくい面半径を 0.010 mm とし、逃げ面が工具干渉しないように逃げ角を 10 度として、通常より大きく取った。荒取り加工も切削加工で形状精度が 1 μ m となるまで行

い、仕上げ加工は前述した補正方法を行いながら、切り込み量 100 nm で 15 回の切削加工を行った。この結果、第 1 面 S1 に対応する転写光学面の加工形状精度は 50 nm 以下、第 3 面 S3 に対応する転写光学面の加工形状精度は 80 nm 以下であった。また、加工表面粗さは Rz 20 nm で、実施例 1 と比較するとやや悪いが研磨加工することなく十分使用でき、本発明者らは、本発明を用いることで、NA1 を越え十分な光学性能を発揮できる近接場光学素子を世界で初めてガラス成形し実現することができたのである。

【0092】

【発明の効果】

このように本発明によれば、従来の研削加工と研磨加工ではほとんど創成が不可能な転写光学面形状についても、創成し実用に供することができた。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

本発明者らが製作した光学素子成形用金型によって成形される光学素子の側面図 (a) 及び正面図 (b) である。

【図 2】

本発明者らが製作した光学素子成形用金型の転写光学面の形状誤差を示す図である。

【図 3】

本発明者らが製作した光学素子成形用金型の転写光学面の粗さを示す図である。

【図 4】

本発明者らが製作した光学素子成形用金型の転写光学面の形状誤差を示す図である。

【図 5】

本発明者らが製作した光学素子成形用金型の転写光学面の粗さを示す図である。

【図 6】

本発明の実施の形態にかかる転写光学面の加工方法を実行できる超精密加工機

の斜視図である。

【図 7】

図 6 の超精密加工機に用いるダイヤモンド工具の斜視図である。

【図 8】

研削加工装置の斜視図である。

【図 9】

本発明者らが製作した光学素子の断面図である。

【図 10】

本発明者らが製作した光学素子の成形用型の転写光学面を砥石で研削加工する状態を示す図である。

【符号の説明】

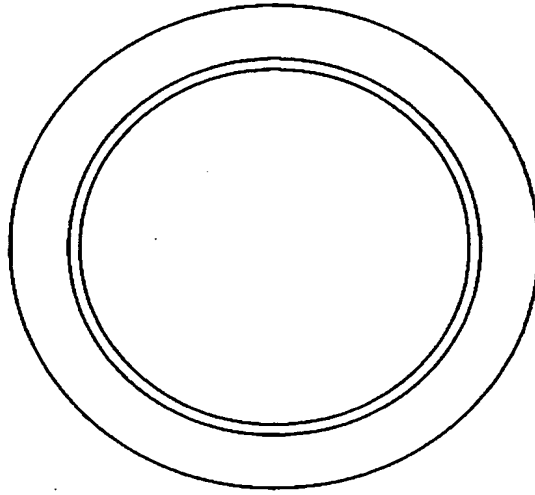
- 1 台座
- 2 X軸テーブル
- 3 ダイヤモンド工具
- 4 Z軸テーブル
- 5 主軸

【書類名】

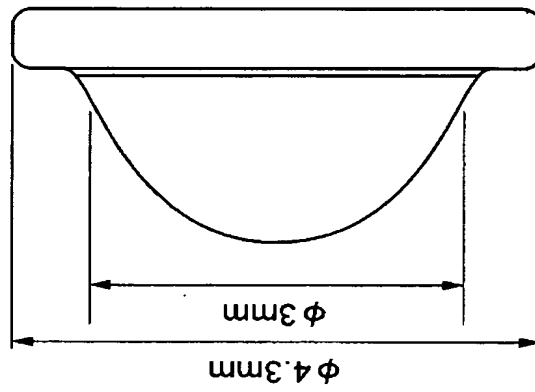
図面

【図 1】

(b)



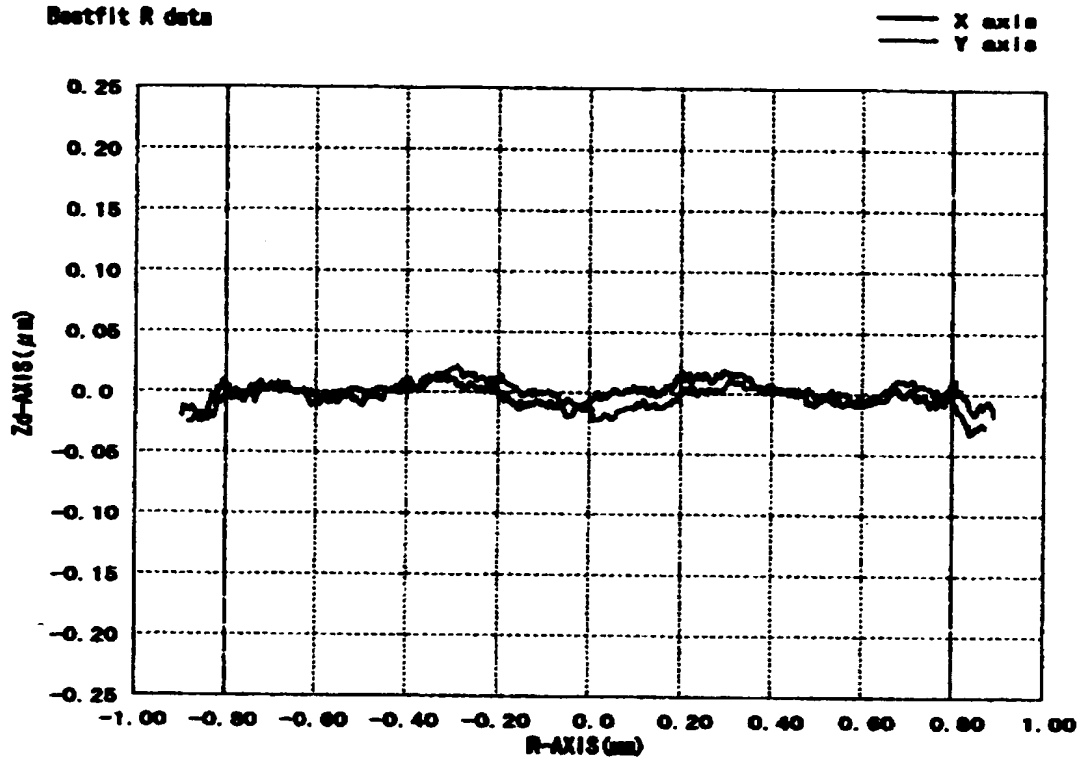
(a)



【図 2】

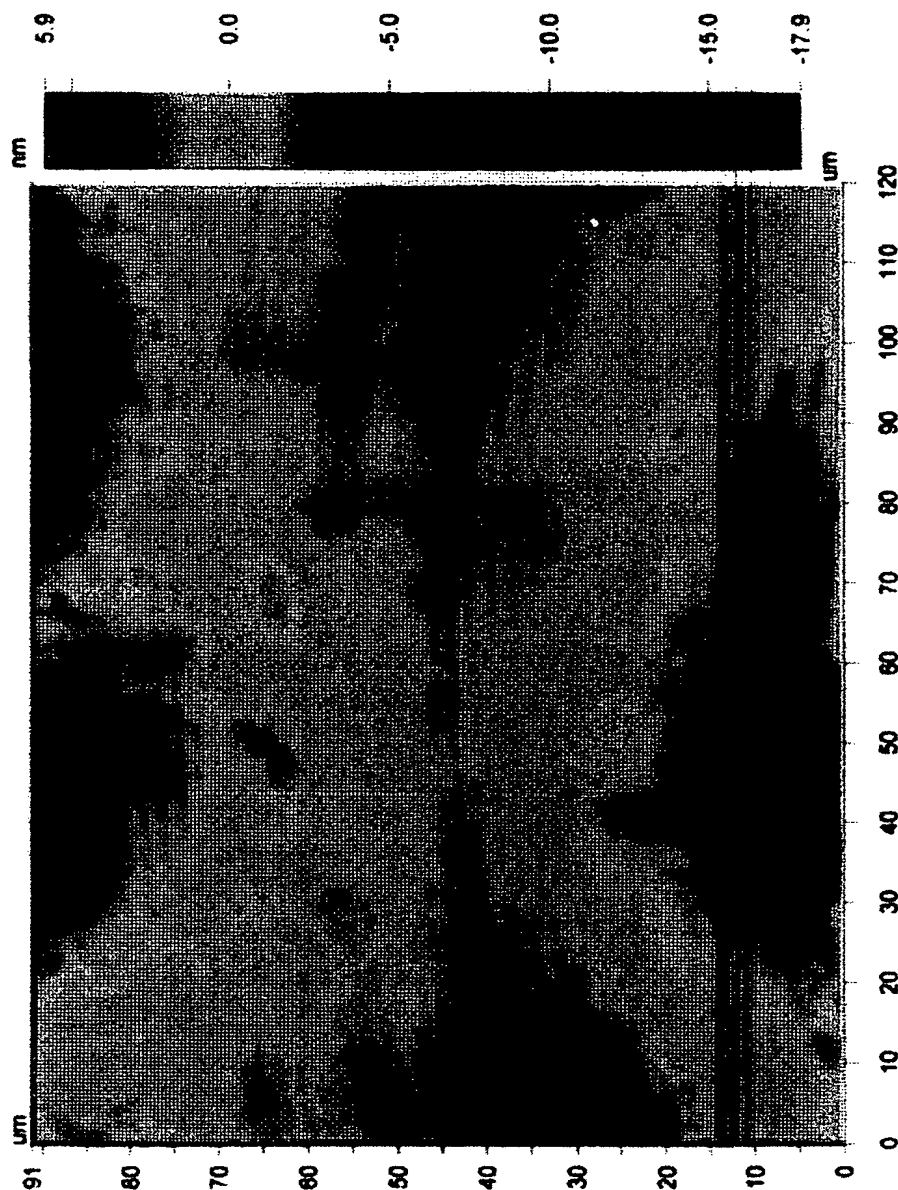
Bestfit R = -5.0854621 (nm)

Bestfit R data



R.M.S = 0.0081 (μm) P-V = 0.0454 (μm)

【図 3】



Surface Statistics:

Ra: 1.61 nm
Rq: 1.97 nm
Rz: 12.99 nm
Rt: 23.76 nm

Set-up Parameters:

Size: 736 X 480
Sampling: 163.10 nm

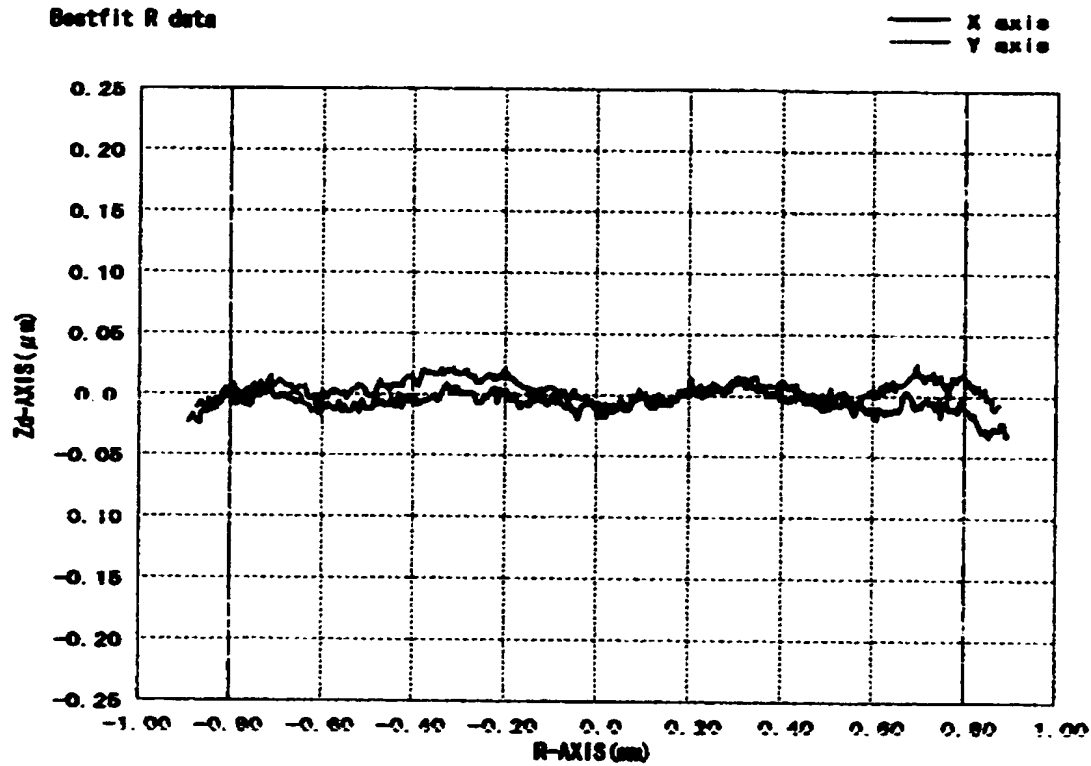
Processed Options:

Terms Removed:
Curvature & Tilt
Filtering:
None

【図 4】

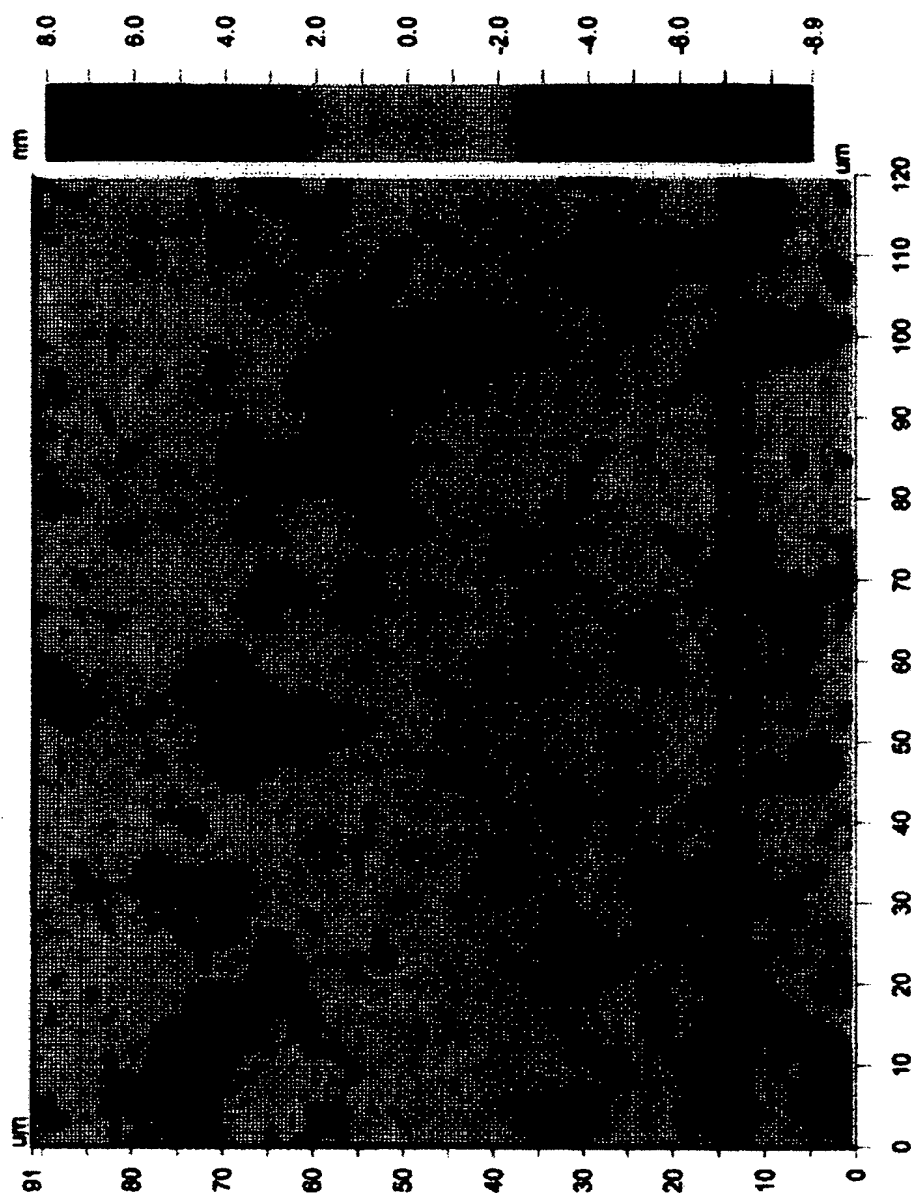
Bestfit R = -5.081859 (nm)

Bestfit R data



R. M. S = 0.0090 (μm) P-V = 0.0457 (μm)

【図 5】



Surface Statistics:

Ra: 1.99 nm

Rq: 2.46 nm

Rz: 15.43 nm

Rt: 16.86 nm

Set-up Parameters:

Size: 736 X 480

Sampling: 163.10 nm

Processed Options:

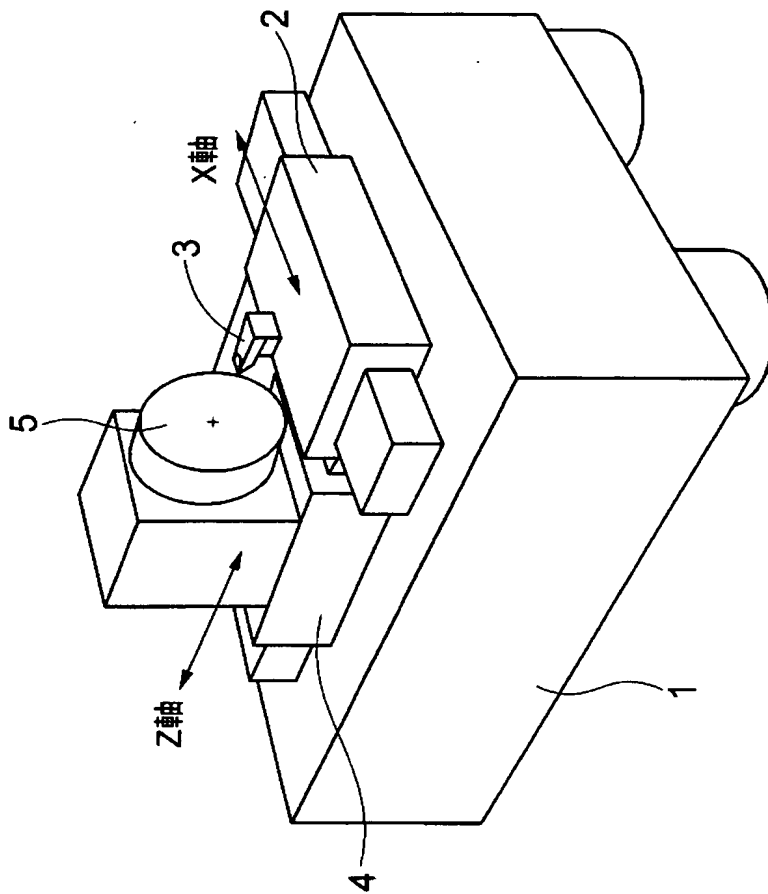
Terms Removed:

Curvature & Tilt

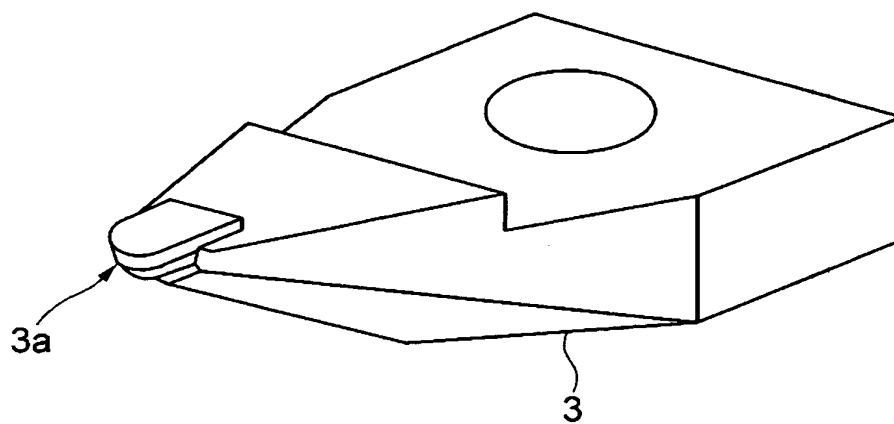
Filtering:

None

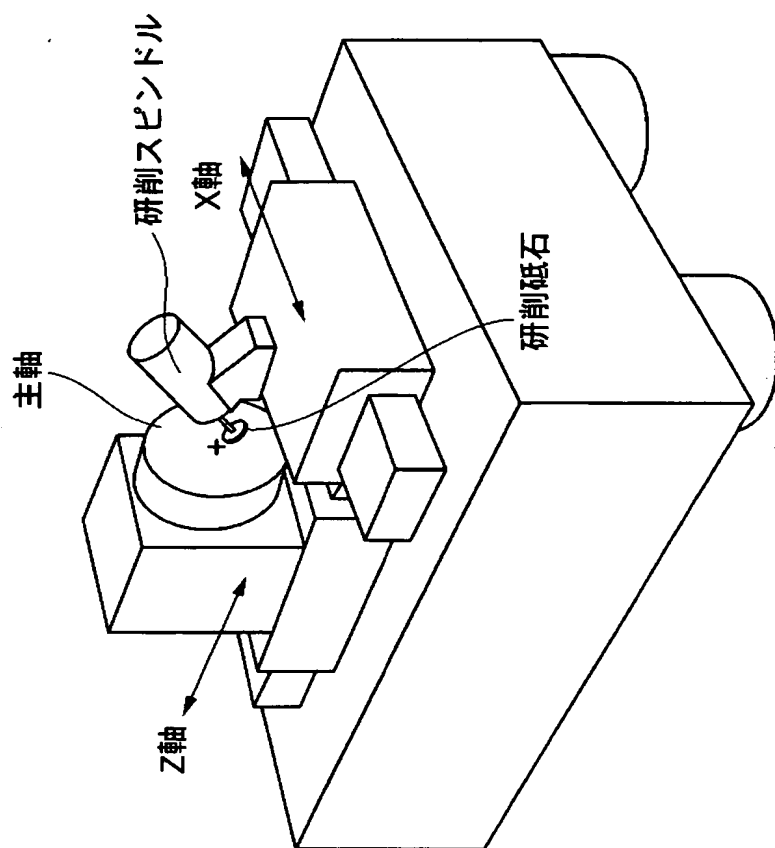
【図 6】



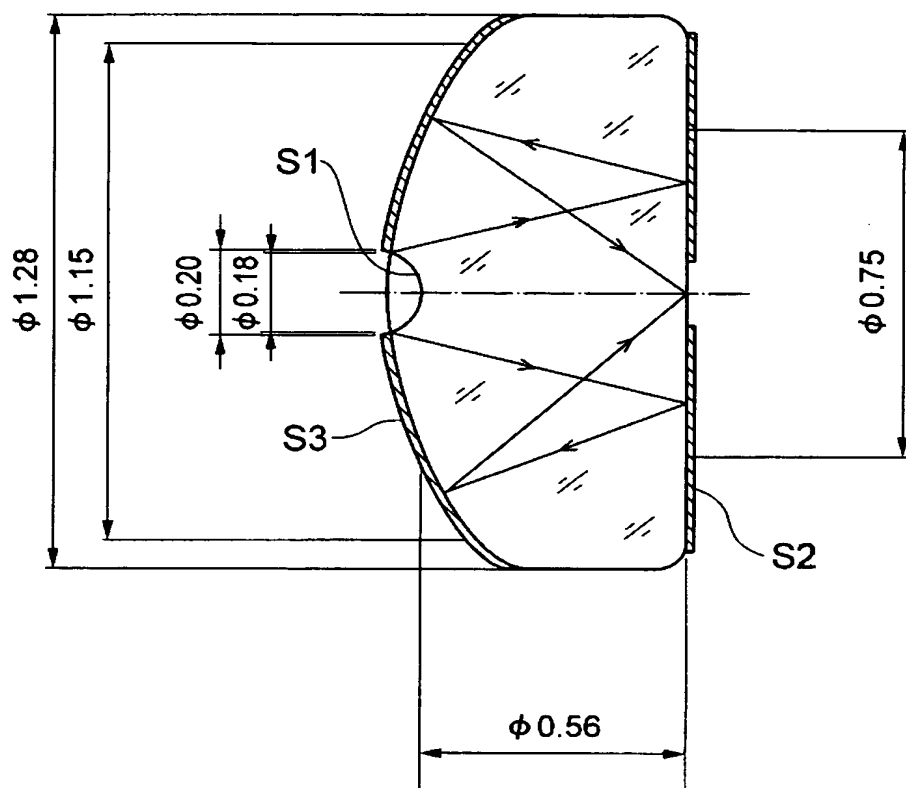
【図 7】



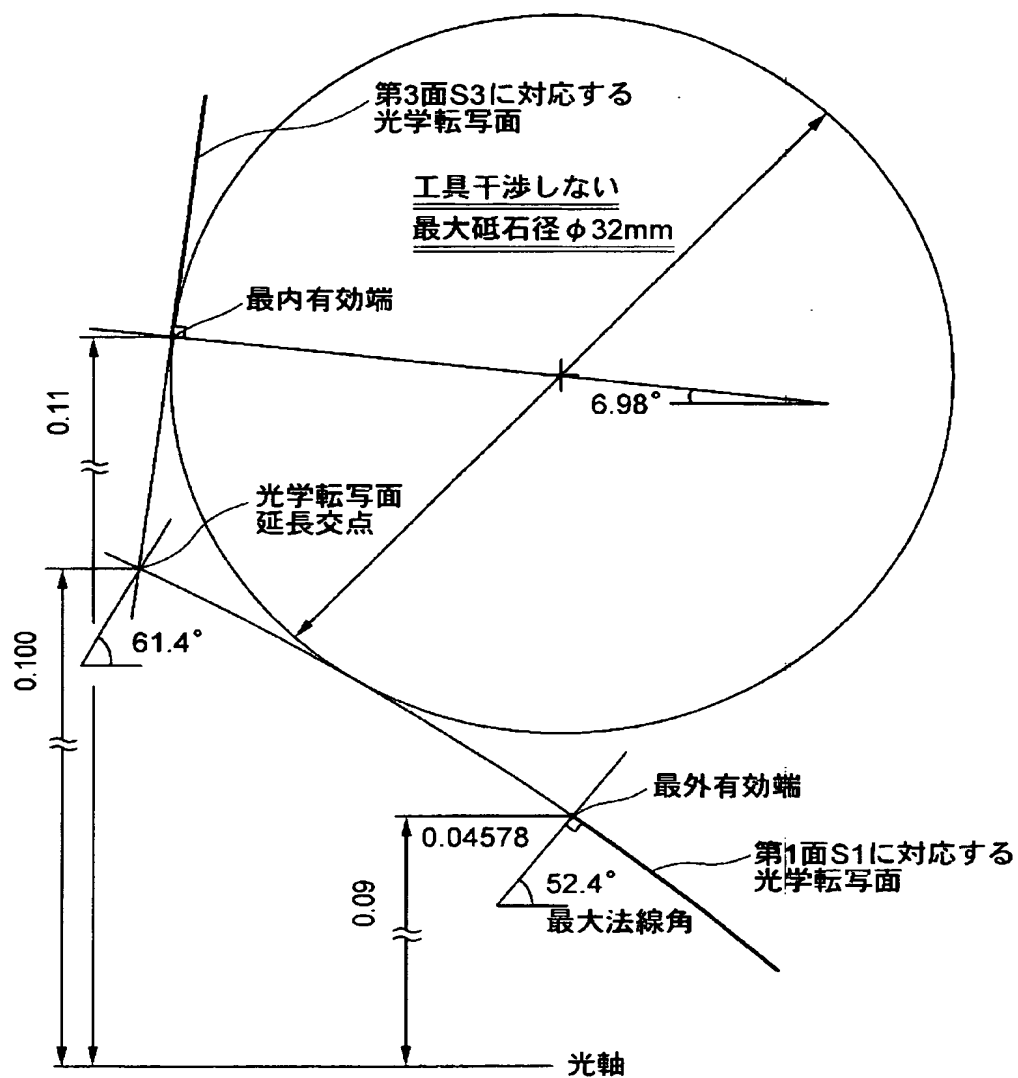
【図 8】



【図 9】



【図10】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】

従来全く考案されることがなかった切削加工により、これを創成、実現する転写光学面の加工方法、加工機及びそれにより形成された光学素子成形用型を提供する。

【解決手段】

従来における当業者の経験や知識に基づけば、ロックウェル硬度HRA80以上もしくはビッカース硬度でHV1000以上の非常に高い硬度を有する素材を切削して転写光学面を創成するということは、常識に反する行為といえ、これを肯定する文献は、発明者らが確認した範囲で存在しない。本発明者らは、ロックウェル硬度HRA80以上もしくはビッカース硬度でHV1000以上の非常に高い硬度を有する素材を用いて光学素子成形用型の転写光学面を、いかにして精度良く形成するかという困難な課題に直面し、従来の常識にとらわれることなく全ての加工方法を研究し、その結果、例えばダイヤモンド工具を用いて切削加工を行うことで、かかる高い硬度の素材から転写光学面を創成できることを見いだしたのである。

【選択図】 図6

認定・付加情報

特許出願の番号	特願 2 0 0 2 - 3 4 7 8 5 0
受付番号	5 0 2 0 1 8 1 3 2 2 7
書類名	特許願
担当官	第五担当上席 0 0 9 4
作成日	平成 1 4 年 1 2 月 4 日

< 認定情報・付加情報 >

【提出日】	平成14年11月29日
-------	-------------

次頁無

特願 2 0 0 2 - 3 4 7 8 5 0

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[0 0 0 0 0 1 2 7 0]

1. 変更年月日

1 9 9 0 年 8 月 1 4 日

[変更理由]

新規登録

住 所

東京都新宿区西新宿 1 丁目 2 6 番 2 号

氏 名

コニカ株式会社

2. 変更年月日

2 0 0 3 年 8 月 4 日

[変更理由]

名称変更

住 所

東京都新宿区西新宿 1 丁目 2 6 番 2 号

氏 名

コニカミノルタホールディングス株式会社